

自動巻取り窓を有するプラスチックハウスに用いるフィルムに生じる損傷生成メカニズムの転がり解析による考察

著者	野田 尚昭, 黄 雲鵬, 酒井 悠正, 佐野 義一, 高瀬 康
雑誌名	農業および園芸
巻	96
号	4
ページ	318-326
発行年	2021-04-01
その他のタイトル	Rolled Plastic Film Fracture Mechanism Used for Automatic Roof Ventilation in Japanese Greenhouses
URL	http://hdl.handle.net/10228/00008484

自動巻き取り窓を有するプラスチックハウスに用いるフィルムに生じる 損傷生成メカニズムの転がり解析による考察

野田 尚昭*・黄 雲鵬**・酒井悠正**・佐野義一*・高瀬 康***

〔キーワード〕: ビニールハウス, 農業用フィルム,
プラスチックフィルム, 有限要素法,
高分子材料

1. 緒言

自動巻き取り窓を有するプラスチックハウスはプラスチックフィルム（以後フィルムと略す）製の上部を自動開閉して温度調節ができ、停滞する高温域を比較的短時間で緩和できる。図1に自動巻き取り窓を有するプラスチックハウス、図2にその接触状態を模式的に示す。この自動巻き取り窓を有するプラスチックハウスは、高温期に屋根面を全て開放して、換気効率を高めることができ、日本ではフルオープンハウスと言われている¹⁾。しかし、このような自動巻き取り窓を有するプラスチックハウスでは、頻繁に開閉が繰り返されるために、用途によってはフィルムに数ヶ月で損傷が生じ、短期間で取替える必要がある。このため通常のプラスチックハウス並に耐用年数2年以上にできるような改良が

求められている。

これまでに、ローラーによるフィルムの変形挙動の解析は、プラスチックフィルムの圧延問題では行われている²⁾。しかし、直交する円柱間にフィルムが介在する接触解析については、野田ら³⁾が、フィルム損傷の実体調査と、有限要素法を用いて2本の直交パイプ間に静的に挟まれたフィルムの応力・ひずみの解析を行った例があるのみで、他には見当たらない。さらに野田ら³⁾は、実際のハウスにおける調査の結果、フィルム損傷は転がり方向に対して直角方向にしわが生じ、それが線状傷に進んでいくこと、線状傷の起点はフィルムの内側（アーチパイプ側）に存在することを明らかにした上で、フィルム損傷に至るプロセスを示している。そのフィルム損傷生成プロセスは以下のように要約される。まず、フィルムが直交する2本のパイプ間で転がり圧縮を繰り返し受けて、転がり方向に帯状に延伸される。次に、延伸された帯状域にみられるしわは、帯状域両側の伸ばされてない部分から伸びの変形が拘束されてしわが形成される。このとき、フィルムはアーチパイプと滑り接触状態にあり、転がり状態の



図1 内部温度を自動的に制御するフルオープン型プラスチックハウス（野田他³⁾から転載）

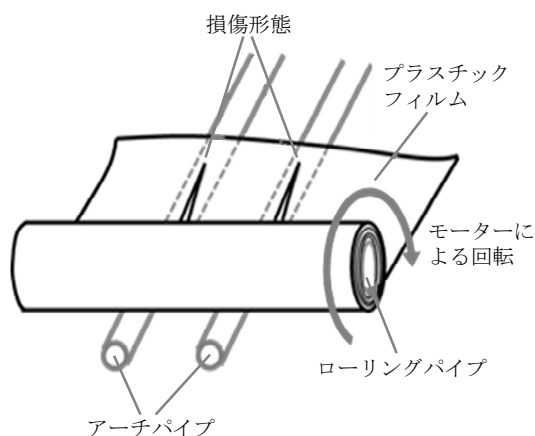


図2 パイプとモーターを使用して屋根カバーフィルムを巻き取る自動巻取り装置（野田他³⁾から転載）

*九州工業大学大学院 工学研究院 機械知能工学研究系 (Nao-Aki Noda, Yoshikazu Sano)

**九州工業大学大学院 工学府 弾性力学研究室 (Youpeng Huang, Hiromasa Sakai)

***九州工業大学 戸畑・若松キャンパス技術部 (Yasushi Takase)

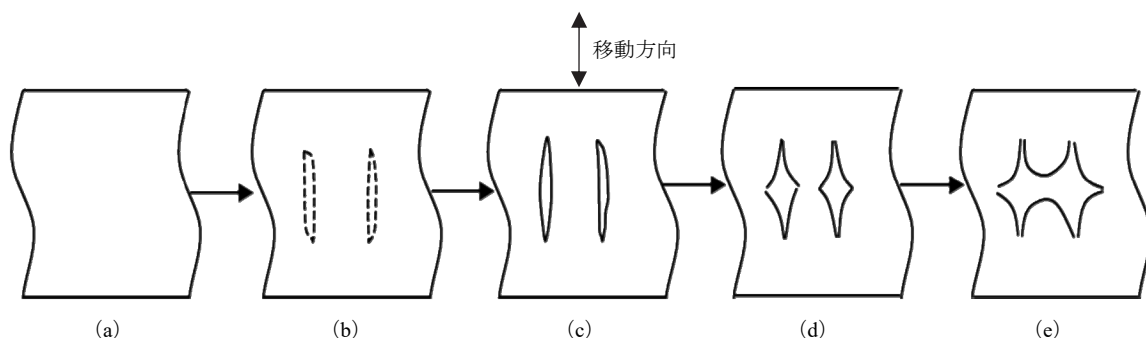


図3 温室フィルムの損傷進行の予測

損傷は、プラスチックハウスのフレームのパイプと接触しているフィルムの内面で最初に発生する。この図では、フィルムは水平方向に巻かれている。(a) 無傷のプラスチックフィルム、(b) しわの形成、(c) 線の傷の形成、(d) 線の傷の発生、(e) 破損と破断 (野田他³⁾ から転載)。

フィルム外側よりも表面が粗いアーチパイプ外表面と接触するフィルム内側からしわが折れ込まれて、延伸直角方向の線状傷となる³⁾。野田ら³⁾は図3に示すように、この線状傷が開口、連結して延伸方向に沿う破断に至ることを報告している。野田ら³⁾は、設計・試作した転がり損傷試験機を用いた実験により、夏季の条件（アーチパイプの到達温度70℃）において、上記のプロセスによりフィルムのしわや線状傷が発生し、フィルムが破断に至ることを検証している。さらに有限要素法を用いて直交パイプ間に介在させたフィルムに対して静的な接触条件下での応力・ひずみ解析を行い、フィルム厚の減少量が線状傷の生成密度と比例関係にあることを報告している。

本研究では、フィルム破断に重要な役割を有すると考えている線状傷の生成メカニズムを力学的な解析により詳細に解明する。具体的には、アーチパイプ上に置かれたフィルム上で巻き取りパイプを転動させ、その結果フィルムに生じる厚み減少等、様々な挙動を調べる。そこでは、フィルムの種類やフィルムとパイプ間の摩擦係数およびアーチパイプ面の粗度との接触条件を変えて、有限要素法を用いて解析する。本研究によりフィルムに生じる挙動およびその要因を明らかにできれば、フィルム寿命の延長技術の開発が可能となり、自動巻き取り窓を有するプラスチックハウス普及への貢献が期待できる。

2. 実験方法

2.1 アーチパイプ表面粗さの測定

線状傷のフィルムの折れ込み起点がアーチパイプ側にあるため、その影響要因として考えられるアーチパイプ表面粗さを、表面粗さ測定機（サーフコーダ SE1700, 小坂研究所製）により測定した。本研究ではローリングパイプの直径を d_1 、アーチパイプの直径を d_2 とする。転がり損傷試験の基準として用いるアーチパイプの直径は、ローリングパイプと同じく38 mmである。またアーチパイプの表面粗度がフィルムへ与える影響をみるため、同材質で直径が25 mmの磨き棒鋼（粗さ $R_y = 2-3 \mu\text{m}$ ）の粗さを研磨シート（Sandpaper #5, #280, #880）で調整したアーチパイプ試験片も用いた。

2.2 線状傷の測定

1. で測定した表面粗さの異なるパイプ（基準パイプ及びアーチパイプ試験片）を用いてフィルムに生じる線状傷の数を測定する。測定器及び測定方法は野田ら³⁾と同様とした。

2.3 転がり接触荷重を受けるフィルムに生じる変形の解析

図4に転がり接触解析のモデルを示す。モデル寸法は野田ら³⁾が行った静的接触解析で使用したものと同じである。本研究で対象とするローリングパイプとアーチパイプの接触状態は、ローリングパイプに対するフィルムに巻き取り回数（巻き取り初期の薄い状態や、後期の直径が大きな状態）によって異なる。そこで、より接触圧が厳しい状態（フィルムがローリングパイプに巻き取られていない状態）を想定した。そこで、図4に示すような、直交する

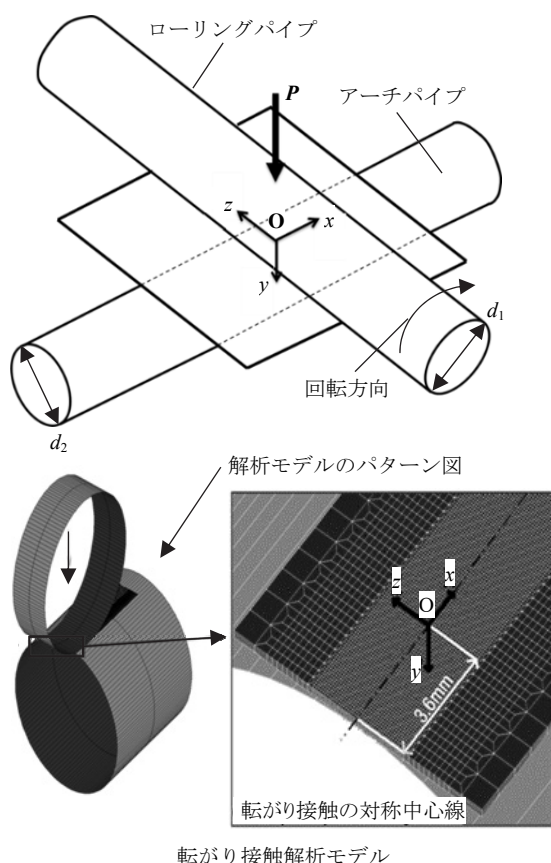


図4 転がり接触解析のFEMメッシュ図 ($P=75\text{N}$, $T=70^\circ\text{C}$, $d_1=d_2=38\text{mm}$)

円筒間にフィルムが介在する転がり接触解析を、有限要素法を用いた弾塑性解析により行った。解析ソフトには Marc Mentat 2012 (MSC 製) を用いた。解析コードは Multi Front 法によるスペースソルバである。解析モデルはアーチパイプの外表面が凹凸のない平滑モデルを基準とした。しかし、実際のパイプ表面は平滑ではないため、パイプ表面粗さ相当の突起をアーチパイプに設けたモデルも用いた。接触部の最小メッシュサイズは $0.09\text{mm} \times 0.09\text{mm} \times 0.035\text{mm}$ とし、モデル全体の要素数は 6.2×10^4 である。アーチパイプは鋼（ヤング率 $E=210\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ ）とした。ローリングパイプも実際は鋼であるが、弾性係数がフィルムの400倍以上大きいことから、剛体とした。フィルムは通常のプラスチックハウスや自動巻き取り窓を有するプラスチックハウスに用いられている農業用ポリオレフィン系特殊フィルムとし、野田らが用いたものと

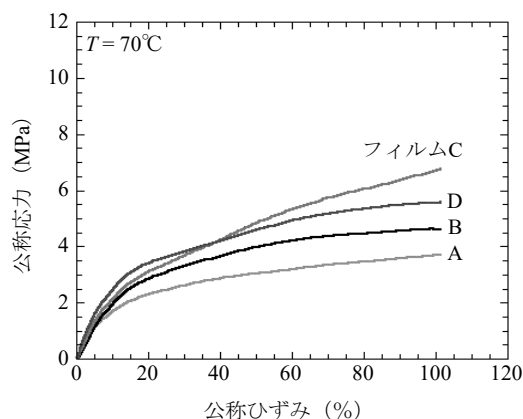


図5 異なるフィルムの応力-ひずみ線図（野田他³⁾から転載）

同様のフィルムを用いた（図5）。

境界条件は、アーチパイプを固定し、フィルムモデルは o 点にて xz 軸方向移動を拘束し、巻き取りパイプを x 軸方向に回転移動させることとした。巻き取りパイプの転がり実態を考慮して角速度 8.4rad/min （転がり速度 1000mm/min ）、またパイプ、フィルム間の摩擦係数として $\mu=0.15$ を用いた⁴⁾。荷重 $P=75\text{N}$ 、回転時間 1.3s 、アーチパイプとフィルムの表面温度は 70°C 、移動距離 21.66mm の範囲で解析した。荷重 $P=75\text{N}$ の設定に際して、以下に述べる理由によりパイプの自重 15N の5倍を用いた。天井の幅方向に一定間隔にて設けられてフィルムを下側から支持するアーチパイプは、それぞれが均一な形状ではない。したがって、それらと直交する巻き取りパイプとの接触状態はパイプ毎に異なる。加えて、風雨によるフィルムへの圧力、さらにはフィルム損傷が巻き取りパイプ端部付近に生じやすいことから、端部付近の応力は大きいと考えられる。また大きな荷重を用いることにより、実験的な損傷生成の加速化も期待される。

図4の基本モデルではパイプ表面を粗さのない平滑なものとして扱うが、実際のパイプ表面の粗さの影響を見るため、粗さの一部を取り出して微小な突起に見立てて、突起を有するアーチパイプを用いた解析も行った。図6に突起を有するパイプモデルの突起寸法を示す。Bに対して、Cは突起の立ち上がり半径を小さくし、DはCに加えて突起を高く、鋭利な形状とした。これは、それぞれフィルム下部面

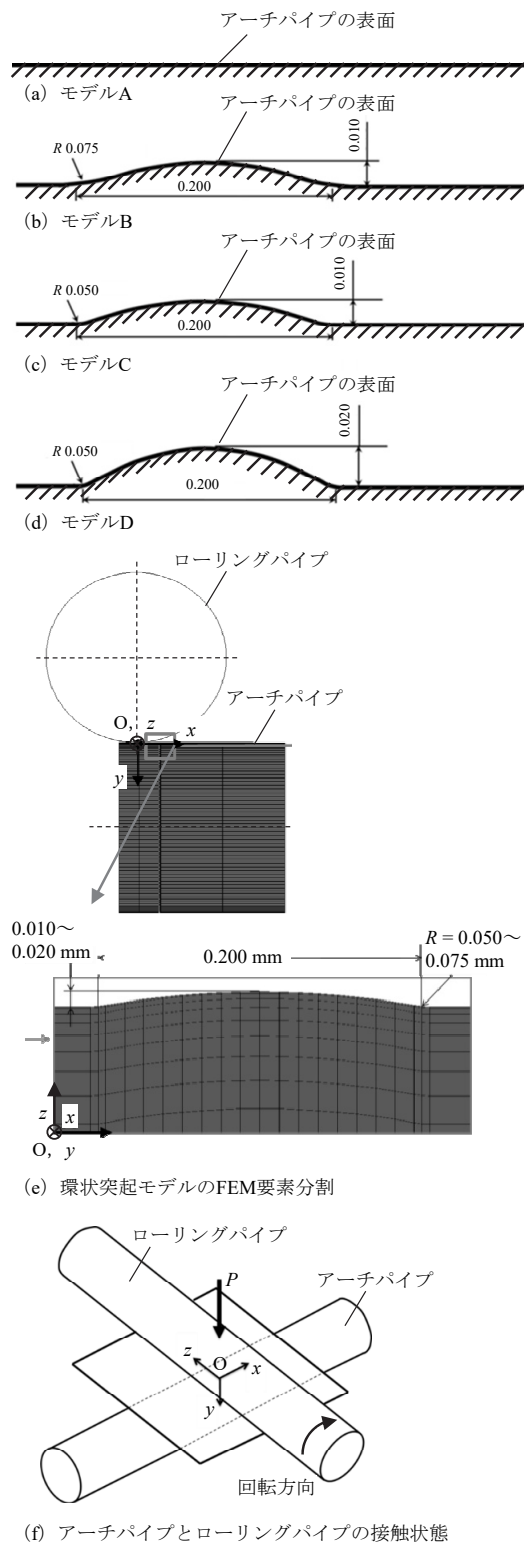


図6 アーチパイプの環状突起モデル

の変形効果を大きくするためである。また、図7にはパイプ表面粗さのモデリングの例を示す。モデルに用いた突起は実体のアーチパイプ面で計測された粗さプロフィール(図8)を参考にし、解析の困難性を考慮して、急峻な形状を避けた。

3. 結果

3.1 アーチパイプ表面粗さの測定結果

アーチパイプの表面粗さの測定結果を図8に示す。基準パイプ及びアーチパイプ試験片の粗さにはばらつきが大きいことは確認しているため、各パイプとも平均的な粗さの結果を示す。図8(a)は基準パイプ、図8(b)、図8(c)及び図8(d)は磨き棒鋼を研磨シート(Sandpaper #5, #280, #880)で研磨したアーチパイプ試験片である。図8より、パイプ表面には0.01 mm~0.03 mmの凸部の存在が明らかになった。この凹凸がフィルムに生じる線状傷の起点となっている可能性がある。

3.2 線状傷の測定結果

図9に、サポートパイプ表面の粗さ R_y と線状傷の発生密度 $m_{\text{line scar}}$ との関係を示す。図9より、表面の粗さ R_y と線状傷の発生密度の間には正の相関があることが明らかとなった。

3.3 転がり接触を受けるフィルムに生じる変形の解析結果

図4に示す基本モデルで、フィルムの転がりによる変形を解析した。今回の解析では宮崎県農業試験場で通常のプラスチックハウスに使用されるフィルムBを対象に、解析を行った。図10にローリングパイプが転動した後のフィルムの変形を示す。図10から、転がり接触を受けるフィルムにはパイプ転がり前方だけでなく接触部分両側(左右)にも、しわが生成されることが分かった。図11にはフィルム厚の減少量 Δt の長さ方向変化と、形状を示す。図11(a)は、パイプが転がり始める前の状態で、フィルム厚が $t_0 = 0.15$ mmからおよそ $t_1 = 0.07$ mmに圧縮された。図11(b)はフィルム厚の減少量が最大になる位置で、およそ $t_2 = 0.04$ mmであった。図11(c)はフィルム厚の変動が少ない定常状態における厚みおよそ $t_3 = 0.06$ mmで、転がり停止終了位置の厚みと等しい(図11(d))。

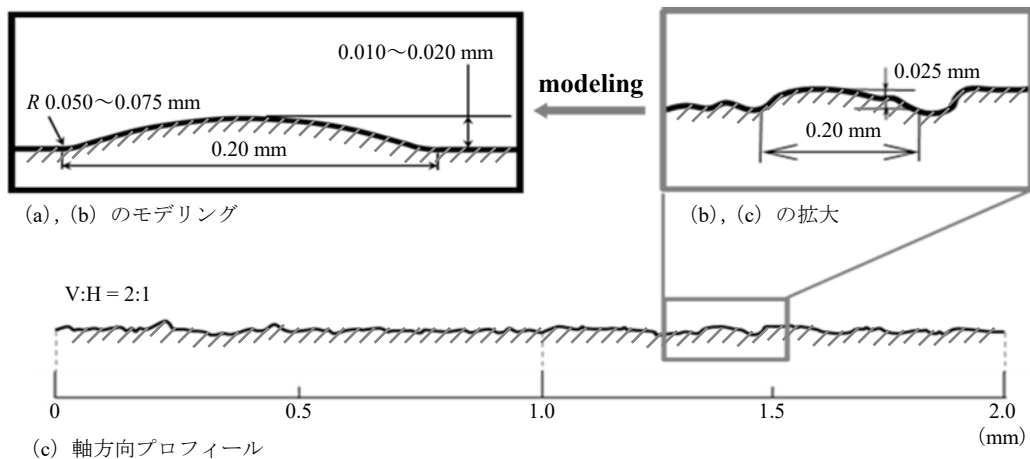


図7 アーチパイプの軸方向の表面粗さと解析モデル

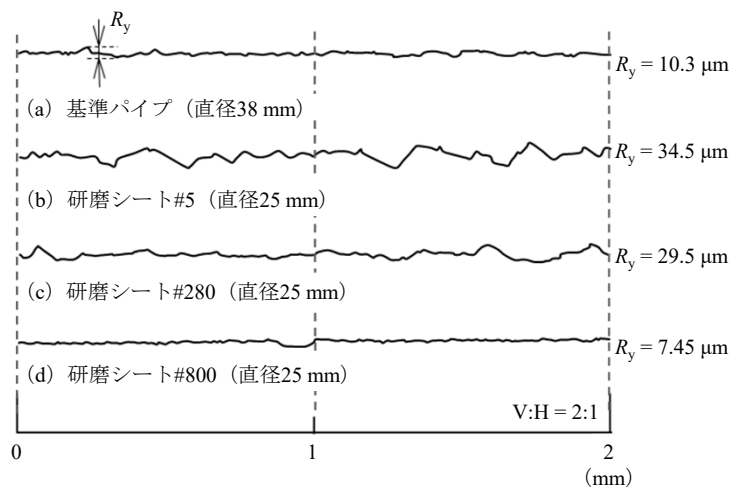
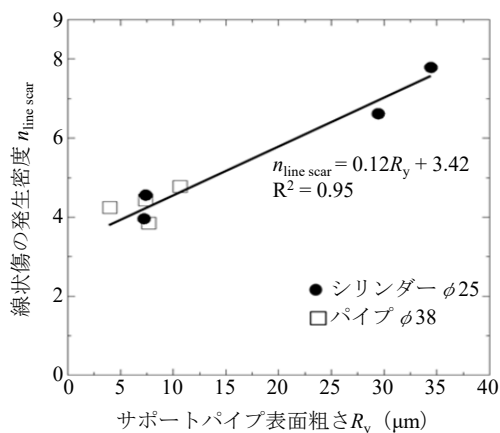


図8 アーチパイプの軸方向の表面粗さのプロフィール

図9 サポートパイプ表面粗さ R_y と線状傷の発生密度 $n_{\text{line scar}}$ との関係

3.4 線状傷と転がり解析における厚み減少量の関係

野田ら³⁾の報告により、静的なフィルム厚の減少量と線状傷の間には正の相関があることが示されている。しかしながら、野田ら³⁾の報告では線状傷の整理に用いたフィルム厚の減少量は静的な接触による結果であるため不十分な結果であると考えられる。そこで野田ら³⁾が測定したフィルムA, B, C および D の線状傷の発生密度 $n_{\text{line scar}}$ を本転がり解析の結果で整理し直してみる。図12に、転がり損傷試験によって4種類のフィルムにおけるフィルム厚の減少量が一定になったときの値 $\Delta t_{\text{steady}}^{\text{rolling}}$ とフィルムに生成された線状傷の発生密度 $n_{\text{line scar}}$ との関係を示す。図12より、転がり解析のフィルム

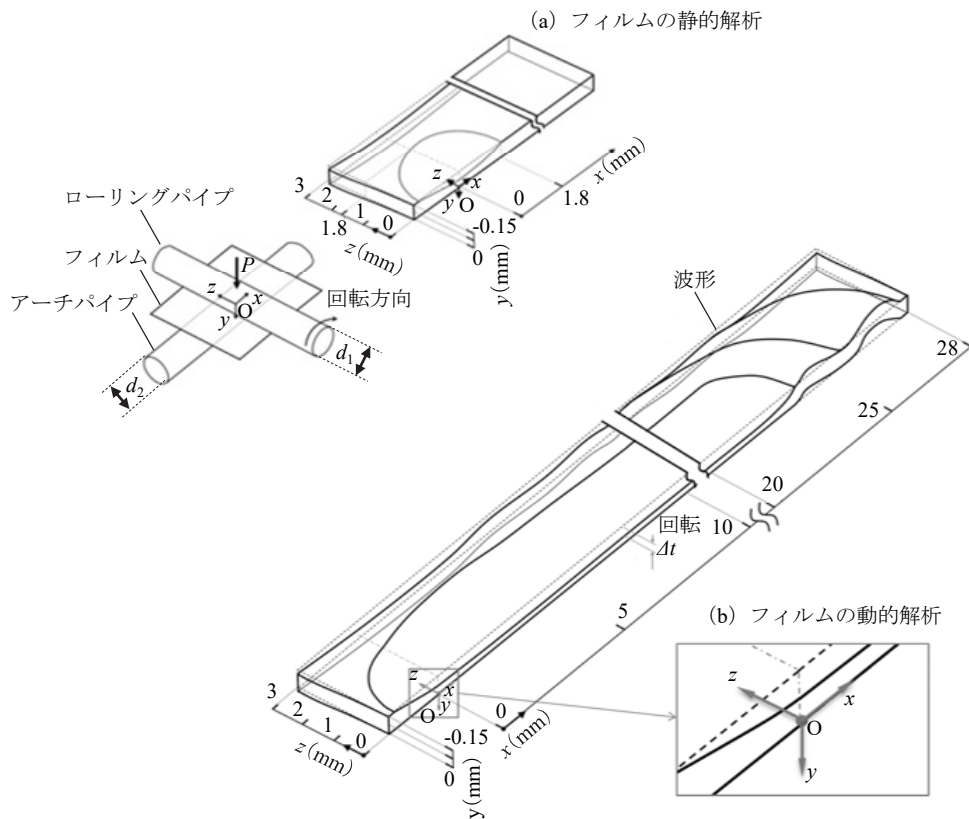


図10 フィルムBの変形 ($P=75\text{N}$, $\mu=0.15$, $T=70^\circ\text{C}$, $d_1=d_2=38\text{mm}$)

(a) 静的接触解析, (b) 転がり接触解析.

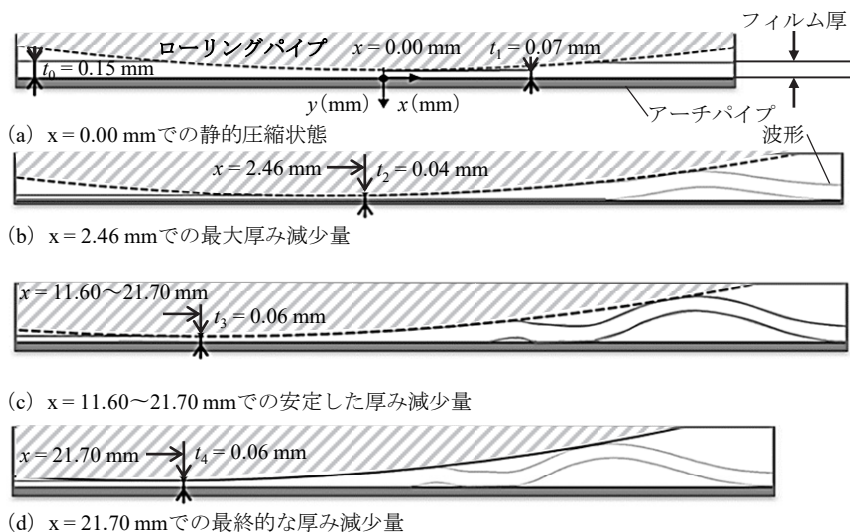


図11 転がり接触位置の移動に伴うフィルム (フィルムB) 形状の変化

x はフィルムの長さ方向に沿った位置 (mm), y はプラスチックのフィルム厚み減少量 (mm).

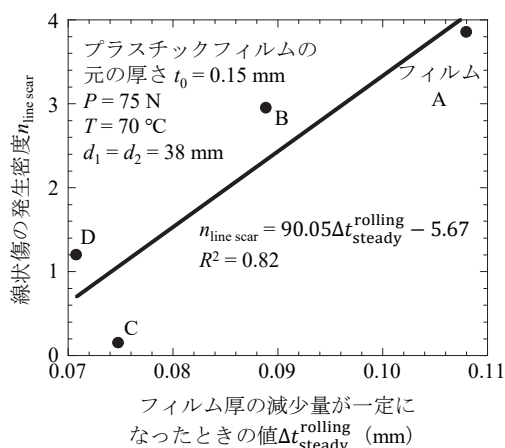


図12 4種類のフィルムにおけるフィルム厚の減少量が一定になったときの値 $\Delta t_{\text{rolling steady}}$ とフィルムに生成された線状傷の発生密度 $n_{\text{line scar}}$ との関係
野田ら³⁾(2015)から転載。

厚の減少量と線状傷の発生密度の間にも正の相関があることが分かった。転がり解析における相関の程度は静的解析における相関と比べ小さくはなるが、強い相関であることは図12より確認できる。本解析により、フィルム厚の減少量と線状傷の発生密度の間には相関があることが示されたと同時に、静的な解析³⁾によるフィルム厚の減少量と線状傷の発生密度間の相関に対する示唆は、解析を行う上で有用であることが確認できた。

3.5 アーチパイプ表面粗さと線状傷の関係

以上で述べてきたように、負荷条件(温度、荷重、パイプの寸法と材質など)を固定すれば、線状傷の生成が、フィルムの違い(70℃加熱強さの違い)によって異なることを明らかにしてきた。そして、フィルム変形量の大きさが線状傷生成に直接関係することが分かってきた。しかし、線状傷の起点がアーチパイプ側に存在するメカニズムについては明らかにできていない。線状傷が表面部の変形であることに注目して、フィルム下側表面への直接的な負荷条件であるアーチパイプ表面の粗さや摩擦係数が損傷生成に与える影響を考える。摩擦係数とフィルム厚減少量の関係を解析したが、パイプとフィルム間の摩擦係数が大きくなっても、線状傷への影響はむしろ小さくなる結果であった。

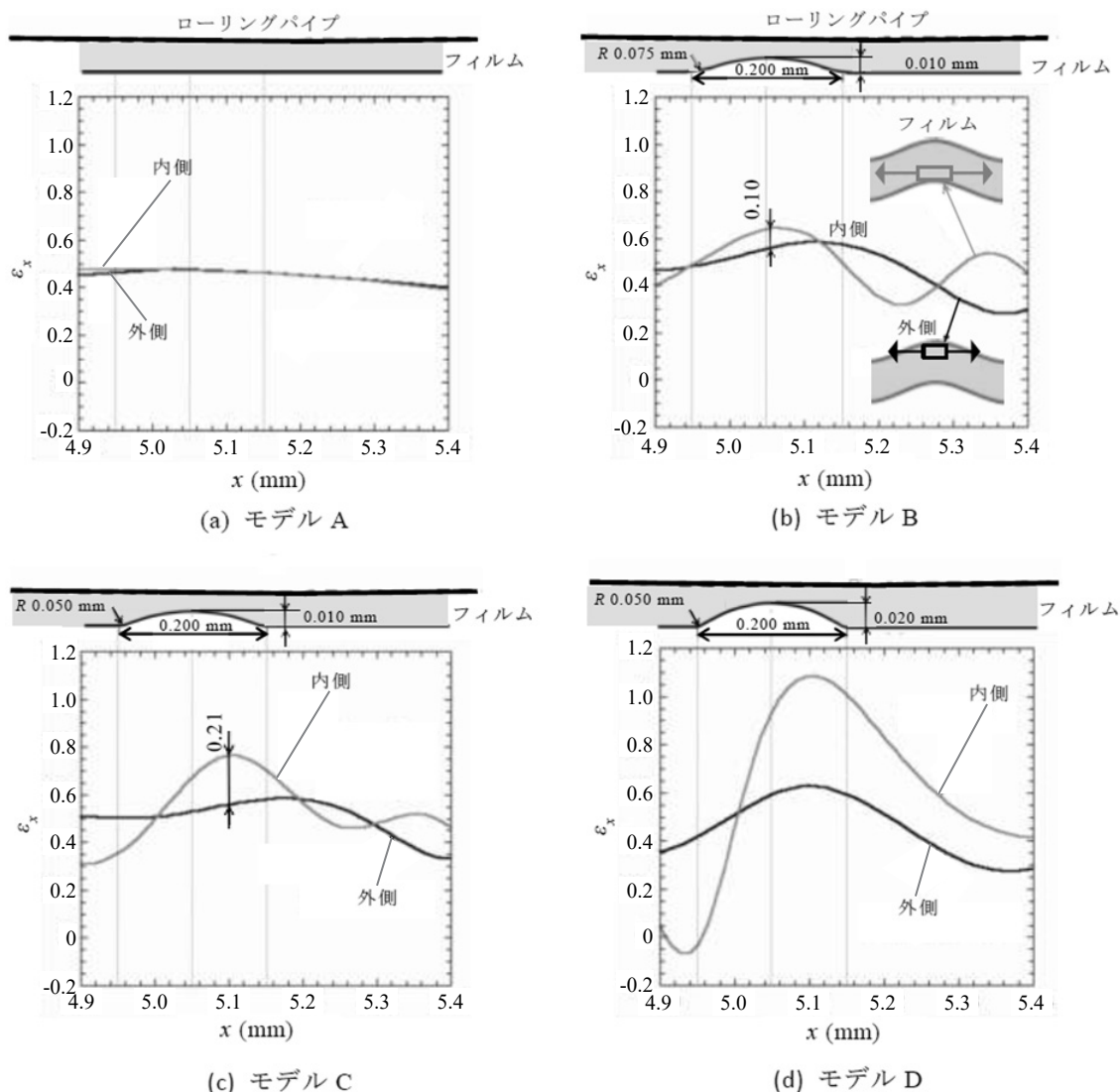
そこで、ここではアーチパイプ面の粗さの線状傷生成に対する影響をみていく。実体パイプの粗さプ

ロフィール(図8)に基づき作製した平滑モデルAおよび3種類の突起モデルB, C, D(図6)で解析した結果を図13に示す。図13はフィルムの転がり方向ひずみを内外両面で比較したもので図13(a)は平滑なモデルAの場合である。モデルB(図13(b))に対して、モデルC(図13(c))は立ち上がりの曲率を小さくし、モデルD(図13(d))は高さの大きい0.02 mmとしている。突起を有するいずれの場合もアーチパイプ側(ハウス内面側)でひずみが大きく、内面側で線状傷が生成されており、実体フィルムにおける観察結果と一致した。次に突起長さ範囲内での内外ひずみ差の最大値に着目すると突起が鋭利な(突起の立ち上がり半径が小さく、突起が高い)モデルD(図13(d))のひずみ差が最大となった。突起による内外ひずみ差が大きくなることで、ひずみの大きい内側で線状傷の生成が進むと仮定すれば、突起効果の大きさ、すなわちパイプ表面の粗さが線状傷生成に大きく影響するものと推察される。また、図9のサポートパイプ表面の粗さ R_y と線状傷の発生密度 n_{linear} との関係は、突起の大きなモデルの内外面ひずみ差が大きくなった解析の結果(図13(d))と対応する。

4. 結言

本研究では、自動巻き取り窓を有するプラスチックハウスの巻き上げ部に用いるフィルムの損傷要因を考察し線状傷生成メカニズムの解明を試みた。有限要素法を用いた転がり条件下のフィルムに生じる変形の解析結果を以下にまとめる。

- (1) フィルム厚の減少量はフィルムに生じる線状傷の発生密度と比例関係にあることを明らかにした。
- (2) フィルム厚の減少量と線状傷の発生密度の間には相関があることが示されたと同時に、静的な解析³⁾によるフィルム厚の減少量と線状傷の発生密度間の相関に対する示唆は、解析を行う上で有用であると考えられる。
- (3) アーチパイプ面の粗さプロフィールを模擬するため、パイプ面に粗さ相当の突起が単独に存在するモデルを想定して、フィルムの変形を解析した。その結果、突起を高く、突起立ち上がりを急峻にすることによりフィルム内

図 13 異なる摩擦係数 μ でのフィルム B の厚さの減少量

側（アーチパイプ側）の転がり方向の伸びが外側の伸びよりも大きくなることを明らかにした。このことから、内側のフィルム面が大きく伸ばされてそれが折れ込むことにより線状傷が生成するメカニズムの妥当性が示された。

- (4) アーチパイプ外表面の粗さを変えて行ったフィルムの転がり損傷試験から、アーチパイプの粗さが大きいほど線状傷が増えることを明らかにした。この結果は粗さを模擬した突起モデルの解析結果とも対応するものである。

謝辞

本研究を進めるにあたって実験用フィルムやパイプの提供、プラスチックハウスに関する様々な情報提供等の御協力を頂いた、株式会社長友農機の久保田保氏、宮崎県総合農業試験場の石原農氏、武内和俊氏、藤田勝見氏に深く感謝致します。また、研究の一部は九州工業大学工学研究科大学院学生の長友博之氏、左亦根氏、焦万中氏、羅奇峰氏、王路宇氏ならびに工学府卒論学生の中島健氏、林佑樹氏、津島勇人氏の助力を得たことを記し、心から御礼申

し上げます。

参考文献

- 1) 農林水産省 (2006) : みやぎの野菜指導指針,
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/miyagi_yasai18_24.pdf, (accessed 2018.2.5).
- 2) 中山和郎, 高須博 (1993) : ポリプロピレンシートの圧延に及ぼす分子量の影響, 繊維学会誌, 49 (1), 54-59.
- 3) 野田尚昭, 長友博之, 羅奇峰, 王路宇, 佐野義一, 高瀬康 (2015) : フルオープン型および谷部自動開閉型ビニールハウスに生じるプラスチックフィルムの損傷の考察とその実験的シミュレーション, 日本機械学会論文集 A 編, 81 (822), 1-15.
- 4) 山口章三郎 (1981) : プラスチック材料の潤滑性—その特性と摺動部への応用, 日刊工業新聞社, 120-125.